МАШИНОСТРОЕНИЕ







Научная статья
УДК 62-768
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53

О контроле прочности металла конструктивных элементов плавучих кранов

Н. Л. Вернези, В. А. Русаков
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена вопросам неразрушающего контроля механических характеристик металлических элементов конструкций грузоподъемных кранов. Надежность грузоподъемных кранов во многом определяет их безопасность. Анализируются основные проявления эксплуатационных отказов плавучих кранов на примере крана УМК-2. Отмечается, что 27 % отказов происходит по причине потери прочности металла их конструктивных элементов. Определение причин таких отказов возможно с помощью проведения неразрушающего контроля механических характеристик металла отказывающих элементов конструкции. Приводится принцип одного из методов неразрушающего контроля прочности, основанного на ударном внедрении в исследуемый металл конического индентора с последующим анализом промежуточных параметров этого внедрения. Даются результаты измерений механических характеристик металла, деформированного в процессе эксплуатации раскоса стрелы плавучего крана. Текущие измеряемые значения механических характеристик металла, получаемые в различных точках раскоса, обрабатываются на соответствие трехпараметрическому закону Вейбулла для получения минимальных значений этих характеристик. В результате такой обработки констатируется, что минимальные значения пределов текучести и прочности, относительного удлинения ниже заявляемых конструкторской документацией на кран. Это может являться одной из причин деформации элемента конструкции при эксплуатации.

Постановка задачи. Рассмотрено применение метода неразрушающего контроля металла раскоса стрелы с целью оценки механических характеристик и установления возможных причин его деформирования при анализе эксплуатационной надежности крана.

Теоретическая часть. При выявлении возможных причин деформации или разрушении стальных элементов крановых конструкций предложено применять метод неразрушающего контроля механических характеристик, основанный на ударном внедрении конического индентора в испытуемую поверхность. Далее предложено полученную выборку значений измеряемой характеристики обрабатывать на соответствие трехпараметрическому закону Вейбулла для оценки параметра сдвига или минимального значения этой характеристики.

Выводы. Получены минимальные значения пределов прочности, текучести и относительного удлинения металла деформированного раскоса стрелы крана УМК-2 на основе применения метода неразрушающего контроля с последующей аппроксимацией статистической информации законом распределения Вейбулла. Сделано заключение о пониженных прочностных характеристиках металла относительно заявленных в технической документации, которые могли стать причиной деформирования элемента стрелы крана.

Ключевые слова: надежность, механические характеристики, грузоподъемные краны, неразрушающий контроль.

Для цитирования: Вернези, Н. Л. О контроле прочности металла конструктивных элементов плавучих кранов / Н. Л. Вернези, В. А. Русаков // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 3. — С. 48–53. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53

Original article

On the Control of Metal Strength of Structural Elements of Floating Cranes

N. L. Vernezi, V. A. Rusakov
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The article is devoted to the issues of non-destructive testing of mechanical characteristics of metal structural elements of cranes. The reliability of cranes largely determines their safety. The main manifestations of operational failures of floating cranes are analyzed on the example of the UMK-2 crane. It is noted that 27% of failures occur due to the loss of metal strength of their structural elements. Determination of the causes of such failures is possible by conducting non-destructive testing of the mechanical characteristics of the failing structural elements metal. The paper provides the principle of one of the methods of non-destructive strength control based on the impact insertion of a conical indenter into the metal under study with the subsequent analysis of the intermediate parameters of this insertion. The results of measurements of the mechanical characteristics of the metal deformed during the operation of the boom strut of a floating crane are given. The current measured values of the mechanical characteristics of the metal obtained at various points of the strut are processed for compliance with the three-parameter Weibull law to obtain the minimum values of these characteristics. As a result of such processing, it is stated that the minimum values of yield strength, strength and elongation are lower than those claimed by the design documentation for the crane. This may be one of the reasons for the deformation of the structural element during operation.
Problem Statement. The application of the method of non-destructive testing of the metal of the boom strut is considered in order to assess the mechanical characteristics and establish possible causes of its deformation when analyzing the operational reliability of the crane.
Theoretical Part. When identifying possible causes of deformation or destruction of steel elements of crane structures, it is proposed to apply a method of non-destructive testing of mechanical characteristics based on the impact insertion of a conical indenter into the test surface. Further, it is proposed to process the obtained sample of values of the measured characteristic for compliance with the three-parameter Weibull law to estimate the shift parameter or the minimum value of this characteristic.
Conclusions. The minimum values of the tensile strength, yield strength and relative elongation of the metal of the deformed boom strut of the UMK-2 crane were obtained on the basis of the application of the method of non-destructive testing with subsequent approximation of statistical information by the Weibull distribution law. A conclusion was made about the reduced strength characteristics of the metal relative to those stated in the technical documentation, which could cause deformation of the crane boom element.

Keywords: reliability, mechanical characteristics, lifting cranes, non-destructive testing.

For citation: Vernezi N. L., Rusakov V. A. On the Control of Metal Strength of Structural Elements of Floating Cranes. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no.3, pp. 48−53. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53

Введение. Грузоподъемные краны являются объектами повышенной производственной опасности, вследствие чего особенно высокие требования предъявляются к их безопасности, в значительной степени определяемой эксплуатационной надежностью. Из анализа работ, посвященных надежности плавучих кранов [1–3], следует, что 22 % отказов вызваны нарушением правил эксплуатации, 27 % отказов связаны с течью в гидравлической системе и 51 % — доля отказов, обусловленных физическими и механическими свойствами металла конструктивных элементов, из которых: 24 % — отказы по причине износа (каната, опорных роликов, подшипниковых узлов, элементов канатно-блочной системы, тормозов и др.) и 27 % отказов имеют происхождением потерю прочности металла (разрушение основного металла и сварных швов, а также чрезмерная деформация элементов металлоконструкции стрелы, контактная деформация опорных роликов и крюков и др.).

В конце 2021 года силами сотрудников кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета произведено обследование технического состояния плавучего крана УМК-2, который использовался при демонтаже старого и строительстве нового Ворошиловского моста через реку Дон в городе Ростов-на-Дону, а также на других водных объектах, где работы мог выполнить только плавучий кран. При обследовании деформированных металлоконструкций, согласно [4], необходимо обращать внимание на дефекты, приводящие к снижению несущей способности конструкции, а именно: отклонению от прямолинейности стоек элементов ферменных конструкций, скручиванию конструкций, несоосности соединений секций стрел, башен, наличию остаточных прогибов пролетных балок и т.п.

В результате обследования было выявлено, что основные отказы, происходившие с краном, приходились на стрелу, а именно на следующие причины: деформацию металла раскоса стрелы, трещины в средней части корневой секции стрелы, трещины в сварных швах корневой секции стрелы, трещины в блоке полиспаста крюка стрелы, дефекты части раскоса стрелы, подвергшиеся деформированию, вследствие чего кран был выведен из эксплуатации.

Постановка задачи. Задачей являлось исследование причины повреждения металлических элементов конструкции стрелы. В общем случае возможны три причины: недостаточно точный расчет конструкции стрелы, несоответствие прочностных характеристик применяемой марки стали требуемым, в соответствии с конструкторской документацией, и перегрузки, допускаемые при эксплуатации машины. Первая причина маловероятна, поскольку кран УМК-2 проектировался в середине 70-х годов в советское время и, как правило, с достаточным коэффициентом надежности по материалу. Чтобы установить вторую и третью причину необходимо было определить прочностные возможности примененного металла поврежденного элемента стрелы. Определение механических характеристик металла действующей машины возможно только на основе применения неразрушающего контроля.

Теоретическая часть. Большинство методов неразрушающего контроля — ультразвуковой, радиационный, магнитный, вихретоковый, акустико-эмиссионный и т.д. предоставляют возможность качественной, а не количественной оценки состояния исследуемого объекта. Поэтому было принято решение применить разработанный в Донском государственном техническом университете метод неразрушающего контроля металла с получением количественных значений его механических характеристик. Метод реализован в системе «Прочность» [5–8], состоящей из электронного блока, включающего в себя аналогово-цифровой преобразователь L-CARDE 14-440, ударного механизма и ноутбука с программным обеспечением [9].

В основе лежит видоизмененный метод оценки твердости по Роквеллу, при этом статическое вдавливание заменено на динамическое с энергией удара 0,16 Дж, а угол при вершине индентора для большей информативности результатов измерения заменен со 120° на 90°. Ударное вдавливание осуществляется за счет пружинного механизма, в котором боек ударяет по держателю индентора. При этом электронный блок фиксирует промежуточные параметры: глубину, максимальную и минимальную скорости, ускорение и замедление индентора в процессе его внедрения в материал и переводит их в механические свойства материала.

Созданию системы предшествовали многолетние исследования механических характеристик большого числа марок сталей различных классов прочности. В результате были получены корреляционные зависимости промежуточных характеристик образа материала, стандартных пределов текучести и прочности относительного удлинения и твердости.

После наполнения этими зависимостями электронного блока достаточно провести измерение вновь исследуемого материала и на экране ноутбука, оснащенного разработанным программным обеспечением, высвечиваются значения стандартных механических характеристик. Система имеет суммарное рассеивание, вызванное разбросом свойств в металле и погрешностью измерения. Предельные значения погрешности одного измерения системой ±4%.

Обсуждение. Контролю подвергся металл деформированного элемента стрелы. Поверхность зачищалась от краски и коррозии до чистого металла, производилось от 10 до 15 измерений в различных точках элемента с единовременной регистрацией механических характеристик.

В соответствии с [10, 11] наилучшим образом распределение получаемых в результате измерений случайных значений механических характеристик описывается трехпараметрическим законом Вейбулла.

$$F(X) = 1 - \exp[-((X - C)/A)^B], \qquad C < X < \infty,$$

где X — величина механического свойства; A, B, C — параметры масштаба, формы и сдвига.

Важнейшим параметром этого распределения является параметр сдвига или минимальное значение механической характеристики.

По этой причине данные, полученные в разных точках элемента, объединялись в один массив (таблица 1) и затем обрабатывались с помощью программы на соответствие трехпараметрическому закону Вейбулла.

Таблица 1

Массив данных, подверженных обработке

Измеренные текущие значения механических характеристик, ранжированные по возрастанию прочностных характеристик		
Значения предела текучести $\sigma_т$, МПа	Значения предела прочности $\sigma_в$, МПа	Значения относительного удлинения δ_5, %
301	431	26
303	437	25
310	439	24
312	445	24
313	451	24
314	453	23
315	455	23
316	457	23
317	458	23
318	459	23
322	460	22
322	460	22
322	460	22
323	461	22
326	461	22
329	461	22
335	462	22
338	462	22
340	464	21
342	468	21
345	470	21
347	471	21
348	479	20
353	482	20
351	492	19
352	499	19

Аппроксимация эмпирических значений предела текучести $\sigma_т$, предела прочности σв и относительного удлинения δ_5 проводилась по методам моментов и максимального правдоподобия с критерием согласия ω^2 (таблица 2).

Таблица 2

Аппроксимация эмпирических значений механических характеристик

Механическая характеристика	Параметр распределения			Метод аппроксимации	Значение критерия согласия ω^2
	Параметр масштаба «А»	Параметр формы «В»	Параметр сдвига (минимальное значение характеристики) «С»		
$\sigma_т$	47,29	2,89	285 (Мпа)	Моментов	0,49
	37,41	2,32	294 (Мпа)	Максимального правдоподобия	0,51
σв	38,91	2,44	427 (Мпа)	Моментов	0,77
	43,22	2,76	423 (Мпа)	Максимального	0,73

Механи-ческая харак-те-ристика	Параметр распределения			Метод аппрок-симации	Значение критерия согласия ω^2
	Параметр мас-штаба «А»	Параметр фор-мы «В»	Параметр сдви-га (минималь-ное значение характерис-тики) «С»		
				правдоподобия	
δ_5	5,45	3,17	17,3 (%)	Моментов	0,51
	5,14	3,04	17,6 (%)	Максимального правдоподобия	0,52

По результатам испытаний обнаружилось следующее. При оценке предела текучести критерий значения ω^2 несколько ниже по методу моментов, что соответствует минимальному значению 285 МПа. При оценке предела прочности значение критерия ω^2 ниже по методу максимального правдоподобия и это соответствует минимальному значению 423 МПа. При оценке относительного удлинения значение критерия ω^2 незначительно ниже по методу моментов и это соответствует минимальному значению 17,3 %.

Заметим, что во всех случаях параметр формы «В» имел значение, превышающее 2, что также указывает на согласованность распределения текущих измеренных значений с распределением Вейбулла.

Выводы. В конструкторской документации на изготовление грузоподъемного крана УМК-2 указан материал раскосов стрелы сталь 09Г2С. Эта сталь должна иметь значения механических характеристик не ниже, чем: $\sigma_т$ = 345 Мпа; σв = 490; δ_5 = 21%. Т.е. минимальные значения механических характеристик испытанного материала уступают заявленным соответствующим значениям для стали 09ГС по пределу текучести на 17 %, по пределу прочности — на 14% и по относительному удлинению — на 18%, что может явиться одной из причин пластической деформации раскоса стрелы.

Библиографический список

1. Слюсарев, А. С. Проблемы использования плавучих кранов, отработавших нормативный срок эксплуатации / А. С. Слюсарев, А. С. Яблоков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2012. — № 30. — С. 91–96.

2. Игнатович, В. С. Анализ тяжелых плавучих кранов и особенностей их эксплуатации / В. С. Игнатович, А. В. Кузьмина, К. В. Перпадя // Научные проблемы водного транспорта. — 2021. — № 68 (3). — С. 68–80. https://doi.org/10.37890/jwt.vi68.204

3. Анцев, В. Ю. Классификация дефектов и отказов грузоподъемных машин / В. Ю. Анцев, П. В. Витчук, К. Ю. Крылов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2015. — № 10. — С. 121–128.

4. РД 10-112-1-04. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения // znaytovar.ru : [сайт]. — URL: https://znaytovar.ru/gost/2/RD_10112104_Rekomendacii_po_ek.html (дата обращения : 30.06.2022).

5. Способ определения технологических и эксплуатационных свойств материалов и устройство для его осуществления : патент 2128330. Рос. Федерация : G01N 3/42 / Д. М. Беленький, А. Н. Бескопыльный, Л. Г. Шамраев. — № 97100203/28 ; заявл. 08.01.1997 ; опубл. 27.03.1999. — 10 с.

6. Способ определения механических характеристики и устройство для его осуществления : патент 2079831. Рос. Федерация : G01N 3/42 / Д. М. Беленький, А. Н. Бескопыльный, Н. Н. Бескопыльный, Е. К. Полибин, Б. А. Песенко. — № 904023277/28 ; заявл. 17.06.1994 ; опубл. 20.05.1997. — 8 с.

7. Способ определения прочностных характеристик металлов и сплавов : патент 2080581. Рос. Федерация : G01N 3/48 / А. Е. Кубарев, А. Х. Аннабердиев. — 93001349/28 ; заявл. 11.01.1993 ; опубл. 27.05.1997. — 6 с.

8. Вернези, Н. Л. Исследование прочностных характеристик металлического крепежа деревянного корпуса речного причала / Н. Л. Вернези, А. А. Веремеенко, Д. С. Вальдман // Инженерный вестник Дона : [сайт]. — 2015. — № 3. — URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3231 (дата обращения : 30.06.2022).

9. Вектор 2015. Программа для ЭВМ : свидетельство № 2015610650 / А. Н. Бескопыльный, А. А. Веремеенко, Н. Л. Вернези ; зарегистрирована в Государственном Реестре программ для ЭВМ Российской Федерации 15.01.2015.

10. ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649.2008). Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы, Распределение Вейбулла. Анализ данных / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2020. — 58 с.

11. Способ определения механических характеристик и физического критерия подобия прочности материала детали : патент 2279657. Рос. Федерация : G01N 3/00 / Д. М. Беленький, А. А. Недбайло. — № 2004133996/28 ; заявл. 12.11.04 ; опубл. 07.10.06. Бюл. № 14. — 12 с.

Поступила в редакцию 05.07.2022
Поступила после рецензирования 29.07.2022
Принята к публикации 29.07.2022

Об авторах:

Вернези Никос Леонидович, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистики» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, vernezin@mail.ru

Русаков Владислав Андреевич, студент кафедры «Эксплуатации транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) vlad.rusakov.1999@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. Л. Вернези — постановка проблемы, разработка концепции статьи; В. А. Русаков — критический анализ литературы, сбор и обработка статистических данных.